

雷达回波跟踪的两种方法及精度比较

汤达章

(南京气象学院, 南京 210035)

周咏梅

(青海省气象局, 西宁 810001)

胡明宝

(空军气象学院, 南京 211101)

提 要

文章研究了用于天气雷达回波跟踪的矩不变量法和相关亮度综合分析法. 首先用多阈值法对回波图象分团, 然后计算出矩不变量和相关亮度系数, 作为判别因子, 分别用于回波团的跟踪, 并作出回波移动的现时预报. 实测资料的试验结果表明: 矩不变量法的跟踪成功率高于相关亮度综合分析法.

关键词: 回波跟踪; 矩不变量; 相关亮度.

1 引 言

早在本世纪 60 年代, 国内外雷达气象工作者就开始利用相邻两时刻的雷达资料, 对降水回波进行跟踪和预报. 最初提出的回波矩心跟踪法^[1], 是对某块回波相继两时刻的矩心位置, 进行最小二乘拟合后外推预报的. 由于该方法是将每块回波简化为一点, 所以它比较适合于对孤立的大而强的回波块进行跟踪, 而对于回波碎而分散的天气, 以及回波发生分裂或合并等情况时, 则跟踪成功率较低. 此时可以采用互相关法, 但我们的工作^[2]表明, 它的成功率也有待改善. 赵青云等提出的相关亮度综合分析法^[3], 在同时考虑相关系数和回波亮度两个因子的情况下, 使识别精度有所提高, 但仍不能解决非均匀流场中回波识别成功率低的问题. 而文献^[4]指出, 雷达回波在移动和变化过程中其矩不变量具有良好的保守性, 因此可以利用矩不变量进行雷达回波的跟踪. 本文具体地介绍它的做法, 并同相关亮度综合分析法作一比较.

2 多阈值分团法

对于块小而多, 分布又较散乱的雷达回波, 若对每一块进行跟踪, 则计算繁琐, 且结果

1993年2月13日收到, 1993年6月22日收到修改稿.

常常并不理想.若将全体回波当作一致移动来看待,又忽视了各块之间的差异性,也会使预报结果较差.于是我们采用多阈值法^[5],将雷达回波图象划分为几个回波团后,进行跟踪处理.其具体做法是:

(1) 确定分团起始点 把回波图象中强度值满足下列两条件的点作为分团起始点:

① 强度值大于给定的初始阈值 5dBZ 以上;② 强度值大于其八邻域中各象点的强度值.这样做的目的是为了将强度极大值点置于划分出的回波团的中心.初始阈值的选取很重要,给得太大会使划分出的回波团太小,造成跟踪的困难;选得太小又会使回波团太大,使回波运动趋于整体性,忽略了某些单体回波的运动.因此要根据回波实况及经验来确定.

(2) 确定特征阈值 利用分团起始点的强度值 Z_m ,便可以计算出特征阈值 Z_c :

$$Z_c = Z_m - \text{MOD}\left(\frac{Z_m}{10}\right) \quad (1)$$

其中 $\text{MOD}(\quad)$ 表示求余函数.

(3) 确定回波团的大小 以分团起始点为中心,以其八邻域点组成初始方形区(图 1 中虚线),判断其外围网格点(图 1 中点线)的强度值是否大于特征阈值 Z_c .若有大于特征阈值的网格点,则放大方形区.并对新的外围网格点进行判断,以决定是否要进一步放大方形区,如此下去,直到某一方形区的外围网格点的强度值都不大于特征阈值,此时的方形区即为划分出的一个回波团.

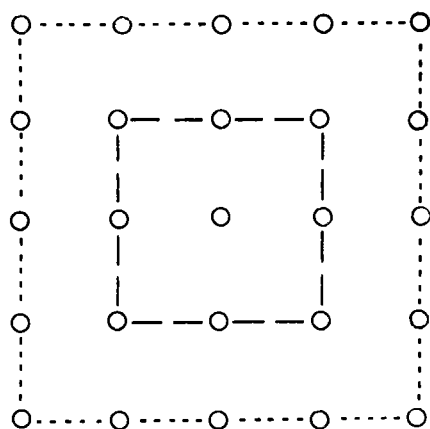


图 1 初始方形区及其外围点示意图

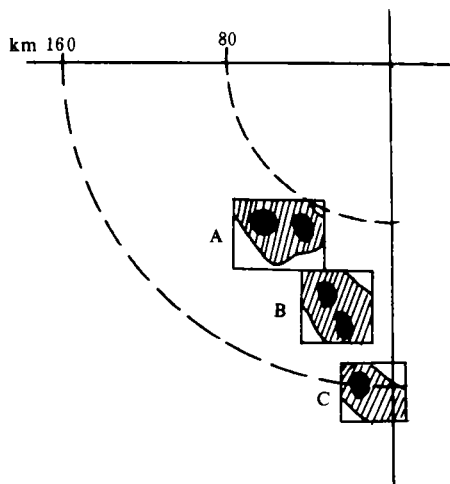


图 2 回波图象分团示意图

重复上述过程,直到将一张回波图象划分完毕.由于划分每一个回波团的起始点强度值不尽相同,也就决定了特征阈值不一样.所以,称这种方法为多阈值分团法.它也可以用于划分强而大的雷达回波块.图 2 为对江苏省台 1990 年 8 月 11 日 16 时 43 分实收的一次降雨回波资料进行多阈值分团法处理的结果.

3 特征量的提取

针对每个回波团,分别提取出下列特征量:

(1) 特征面积 S 定义特征面积为回波团内强度值大于特征阈值 Z_c 的所有网格点的总数, 用于反映回波团的大小.

(2) 特征强度 Z 用回波分团时对应的特征阈值 Z_c , 表示回波团的强弱.

(3) 矩不变量 M 对于直角坐标形式的数字化雷达回波强度场 $Z(i, j)$, 可定义 $(p + q)$ 阶矩

$$m_{pq} = \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N i^p j^q Z(i, j) \quad (2)$$

其中 $p, q = 0, 1, 2, \dots$, i, j 为回波像素点两方向上的网格坐标, $i = 0, 1, 2, \dots, N, j = 0, 1, 2, \dots, N$.

中心矩 μ_{pq} 定义为

$$\mu_{pq} = \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N (i - \bar{i})^p (j - \bar{j})^q Z(i, j) \quad (3)$$

其中 $\bar{i} = m_{10}/m_{00}, \bar{j} = m_{01}/m_{00}$. 在物理意义上, m_{00} 反映了回波团的总强度, 而 (\bar{i}, \bar{j}) 则为强度重心坐标. 中心矩 μ_{pq} 则反映了强度场相对于重心的分布情况, 如 μ_{20} 和 μ_{02} 分别表示回波强度场对通过强度重心的垂直和水平轴线的惯性矩, 若 $\mu_{20} > \mu_{02}$, 则可能是一个水平方向伸长的带状回波. 而 μ_{30} 和 μ_{03} 的幅值可以反映回波团的不对称性, 当回波强度分布完全对称时, 其值为零.

标准化中心矩 η_{pq} 定义为

$$\eta_{pq} = \frac{\mu_{pq}}{\mu_{00}^{\gamma}}, \quad \gamma = \frac{p+q}{2} + 1 \quad (4)$$

利用它们导出下列不变量矩组

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= \eta_{20} + \eta_{02} \\ \varphi_3 &= (\eta_{30} - 3\eta_{12})^2 + (3\eta_{21} - \eta_{03})^2 \\ \varphi_4 &= (\eta_{30} + \eta_{12})^2 + (\eta_{21} + \eta_{03})^2 \\ \varphi_6 &= (\eta_{20} - \eta_{02}) [(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - (\eta_{21} + \eta_{03})^2] \\ &\quad + 4\eta_{11}(\eta_{30} + \eta_{12})(\eta_{21} + \eta_{03}) \end{aligned} \quad (5)$$

数值试验结果表明^[4], 这一组数之和 $M (= \varphi_1 + \varphi_3 + \varphi_4 + \varphi_6)$, 在回波团的移动变化过程中其值变化较小, 有良好的保守性. 这就为回波团的识别跟踪提供了保证.

(4) 相关亮度综合因子 它综合考虑了相关系数和回波团的平均亮度. 设 t_1 时刻上有一回波团, 其中心位于 (I, J) , t_2 时刻上也有一回波团, 中心在 (I', J') , 则相关亮度综合因子定义为

$$Q_{(I,J)}^{(I',J')} = R_{(I,J)}^{(I',J')} - K_{(I,J)}^{(I',J')} \quad (6)$$

其中 $R_{(I,J)}^{(I',J')}$ 为相关系数, 即

$$R_{(I,J)}^{(I',J')} = \frac{\sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N [Z_1(i, j) - \bar{Z}_1] [Z_2(i, j) - \bar{Z}_2]}{\left[\sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N (Z_1(i, j) - \bar{Z}_1)^2 \cdot \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N (Z_2(i, j) - \bar{Z}_2)^2 \right]^{1/2}} \quad (7)$$

且 $K_{(I,J)}^{(I',J')} = \left| \frac{\bar{Z}_1}{\bar{Z}_2} - 1 \right|$ 为亮度因子.

式中 $\bar{Z}_1 = \frac{1}{N^2} \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N Z_1(i, j)$, $\bar{Z}_2 = \frac{1}{N^2} \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N Z_2(i, j)$ 分别为 t_1 和 t_2 时刻的回波团平均亮度, $Z_1(i, j), Z_2(i, j)$ 分别为两时刻上回波团中 (i, j) 点的强度值.

当这两个回波团结构相似而亮度差别较大时, $R_{(i, j)}^{(t_1, t_2)}$ 和 $K_{(i, j)}^{(t_1, t_2)}$ 的值均较大, 使 $Q_{(i, j)}^{(t_1, t_2)}$ 值较小; 当亮度相近而结构不同时, $R_{(i, j)}^{(t_1, t_2)}$ 和 $K_{(i, j)}^{(t_1, t_2)}$ 均较小, 也使 $Q_{(i, j)}^{(t_1, t_2)}$ 较小; 只有当两回波团亮度相近且结构相似时, $R_{(i, j)}^{(t_1, t_2)}$ 值较大, 而 $K_{(i, j)}^{(t_1, t_2)}$ 较小, 因而 $Q_{(i, j)}^{(t_1, t_2)}$ 较大. 最后一种情况绝大多数出现在不同时刻的同一降水回波团之间, 于是可以通过选取最大的 $Q_{(i, j)}^{(t_1, t_2)}$ 值来跟踪回波团.

事实上, 若回波团前后无生消, 即 $\bar{Z}_1 = \bar{Z}_2$, 于是 $K_{(i, j)}^{(t_1, t_2)} = 0$, 则 $Q_{(i, j)}^{(t_1, t_2)} = R_{(i, j)}^{(t_1, t_2)}$. 这说明相关系数实际上是相关亮度综合因子的一种特殊形式.

4 两种跟踪方法

我们采用逐级识别技术, 以提高跟踪成功率, 具体做法如下:

(1) 矩不变量法 为主要利用矩不变量的一种跟踪方法.

第一级识别 为对回波团面积变化量的限制. 设 t_1 和 t_2 两时刻上各有一块回波团, 其特征面积分别为 S_1 和 S_2 , 则计算面积变化量 ΔS 为

$$\Delta S = \frac{|S_2 - S_1|}{\min\{S_1, S_2\}} \quad (8)$$

$\min\{\}$ 表示取集合中的最小值. 当 ΔS 小于给定的阈值 C_s 时, 可以继续第二级识别, 否则就认为这两块回波不反映同一降水区. 这样做保证了大块回波与小块回波相匹配, 小块与小块之间相匹配, 同时也考虑了天气系统的生消变化.

第二级识别 为对回波团强度变化量的判断. 设通过了第一级识别的两回波团, 其特征强度分别为 \bar{Z}_1 和 \bar{Z}_2 , 则强度的变化量 ΔZ 为

$$\Delta Z = \frac{|\bar{Z}_2 - \bar{Z}_1|}{\min\{\bar{Z}_1, \bar{Z}_2\}} \quad (9)$$

若 ΔZ 小于给定的阈值 C_z 时, 继续第三级识别, 否则返回第一级识别重新开始. 本级识别保证了强回波团之间相匹配, 弱回波团之间相匹配.

第三级识别 对矩不变量进行判断, 这是本跟踪法的关键一级. 设经过前两级识别的两回波团具有的矩不变量分别为 M_1 和 M_2 , 求出

$$\Delta M = \frac{|M_2 - M_1|}{\min\{M_1, M_2\}} \quad (10)$$

若 ΔM 小于给定的阈值 C_m , 则进行第四级识别, 否则回到第一级识别重新开始.

第四级识别 对回波团最大移速的限制. 对通过了上述三级识别的两回波团, 可以计算出它们的质心位移, 从而得到移动速度 V . 若 V 值大于给定的最大限速 V_c , 则返回第一级识别重新开始. 只有当 V 小于 V_c 时, 才认为分别位于 t_1 和 t_2 两时刻上的这两块回波团反映的是同一片降雨区, 将它们配成一对进行跟踪.

重复上述过程, 直到两时刻回波团图象上所有的回波团都处理完. 由上述四级识别组成的跟踪法, 称为矩不变量法, 后面用 SZM 表示.

(2) 相关亮度综合分析法 为主要利用相关亮度综合因子进行回波团跟踪的一种方法. 与矩不变量法不同之处, 只在第三级识别, 将其改为对相关亮度综合因子的判断. 即对通过了面积识别和强度识别的两块回波团, 计算出相关亮度综合因子 Q , 并判断它是否是 t_2 时刻上的这一块回波团与 t_1 时刻上所有回波团之间的相关亮度综合因子的最大值. 若是则可以继续第四级识别, 若不是则回到第一级重新开始. 后面我们用 SZQ 表示这种方法. 用上述两种方法对回波团进行跟踪以后, 便可以进行落区预报. 我们是以 t_2 时刻上的回波团的形状和位置为依托, 进行线性外推预报.

现用 $[x(t_1), y(t_1)]$ 表示 t_1 时刻某块回波的位置坐标, 经过跟踪, 认定到了 t_2 时刻该块回波团的位置为 $[x(t_2), y(t_2)]$, 则外推其 t_3 时刻位置 $[x(t_3), y(t_3)]$ 为

$$\begin{aligned} x(t_3) &= x(t_2) + [x(t_2) - x(t_1)] \frac{FT}{DT} \\ y(t_3) &= y(t_2) + [y(t_2) - y(t_1)] \frac{FT}{DT} \end{aligned} \quad (11)$$

其中 $DT = t_2 - t_1$, $FT = t_3 - t_2$, 后面不再说明.

对于 t_2 时刻未被跟踪的回波块, 根据风场的连续性原理, 利用已跟踪的回波块, 采用距离加权进行外推预报. 设已跟踪的回波团有 N_1 个, 位置坐标在 t_2 时刻为 (x_n, y_n) ($n = 1, 2, \dots, N_1$). 现 t_2 时刻有一未被跟踪的回波团, 位置坐标为 $[x'(t_2), y'(t_2)]$, 则利用已跟踪的第 n 块回波团的位移, 去外推该未被跟踪的回波团的位移时, 所占的权重值定义为

$$(\alpha_n)_x = \frac{(\beta_n)_x}{\sum_{n=1}^{N_1} (\beta_n)_x} \quad (\alpha_n)_y = \frac{(\beta_n)_y}{\sum_{n=1}^{N_1} (\beta_n)_y} \quad (14)$$

其中

$$(\beta_n)_x = \frac{1}{|x_n - x'(t_2)|} \quad (\beta_n)_y = \frac{1}{|y_n - y'(t_2)|}$$

显然第 n 块已跟踪回波团距离该未被跟踪的回波团越近, 则 $(\beta_n)_x$ 、 $(\beta_n)_y$ 越大, 权重值越大, 对其移速的影响也就越大. 于是对未被跟踪的回波团在 t_3 时刻的位置 $[x'(t_3), y'(t_3)]$ 的外推公式为

$$\begin{aligned} x'(t_3) &= x'(t_2) + \frac{FT}{DT} \sum_{n=1}^{N_1} (\alpha_n)_x \Delta x_n \\ y'(t_3) &= y'(t_2) + \frac{FT}{DT} \sum_{n=1}^{N_1} (\alpha_n)_y \Delta y_n \end{aligned} \quad (15)$$

其中 $\Delta x_n, \Delta y_n$ 分别为已跟踪的第 n 块回波团在横向和纵向的位移量. 这样便可以对 t_2 时刻上的所有回波团作出外推预报.

5 资料处理结果

根据上述思想, 对 6 次降水过程的实测雷达资料进行了处理. 其中 4 次为武汉中心台提供的 8 等级的分层资料(1987 年), 另两次为江苏台提供的非分层资料(1990 年), 共有 96 张回波图片, 取样时间间隔为 10 分钟, 降雨类型为对流性降水和混合性降水. 下面从跟

踪和预报两个方面进行分析.

(1) 跟踪成功率 分别对 $(t_2 - t_1) = 10, 20, 30$ 分钟时, 3 种情况进行统计分析, 结果列于表 1.

表 1 两种方法的跟踪成功率统计(%)

资料日期	SZQ 法						SZM 法					
	DT=10		DT=20		DT=30		DT=10		DT=20		DT=30	
1987年5月12日	18/24	75	8/12	67	4/5	80	21/24	88	10/12	83	5/5	100
1987年5月25日	8/10	80	7/9	78	3/3	100	8/10	80	8/9	89	3/3	100
1987年7月22日	25/37	68	11/20	55	12/15	80	30/37	81	15/20	75	12/15	80
1987年8月28日	9/11	82	7/10	70	3/7	43	9/11	82	8/10	80	5/7	71
1990年8月9日	5/7	71	2/3	67			7/7	100	3/3	100		
1990年8月11日	12/18	67	4/7	57	5/6	83	16/18	89	6/7	86	5/6	83
合计	77/107	72	39/61	64	27/36	75	91/107	85	50/61	82	30/36	83
总计					143/204	70					171/204	84

注:表中分母数字表示被跟踪的回波团总数,分子数表示跟踪正确的回波团数.

为判断某回波团跟踪的成功与否,可根据配对跟踪的结果,将 t_2 时刻的回波块外推到 t_3 时刻,若外推后所得的位置与 t_3 实况图重合区域在 70% 以上时,则认为该块回波跟踪成功.图 3 给出了对 1990 年 8 月 11 日的一次降水过程进行跟踪处理后的实况与跟踪结果的对照.图 3(a) 为相关亮度综合分析法的分析结果,显然 A、B 两回波团跟踪成功,C 回波团跟踪失败.图 3(b) 为矩不变量法的分析结果,A、B、C 都被成功地跟踪.图中阴影区为 t_3 实况,正方形区为对跟踪结果外推到 t_3 时的位置.

显然,初步的计算结果表明了 SZM 法的跟踪成功率高于 SZQ 法,这说明了矩不变量的保守性较好,有利于回波的识别跟踪.

(2) 预报准确率 我们是采用等间隔外推预报的,即 $t_3 - t_2 = t_2 - t_1$,这就相当于对同一尺度的大气运动进行监测后预报.我们对两种方法的跟踪结果,进行了 10, 20, 30 分

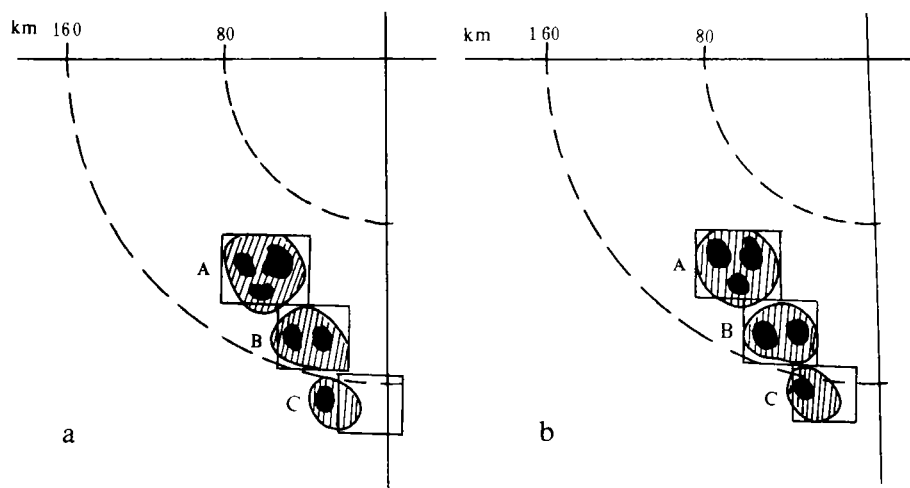


图 3 相关亮度综合分析法(a)
与矩不变量法(b)跟踪结果与实况的对照

钟的外推预报.并用实况图来判断预报效果,结果统计于表2.

表2 SZQ法(a)SZM法(b)预报准确率(%)

资料日期	$DT=FT=10$				$DT=FT=20$				$DT=FT=30$			
	I		II		I		II		I		II	
1987年5月12日	18/24	75	11/17	65	7/9	78	10/13	77	3/4	75	5/8	63
1987年5月25日	8/10	80	4/5	80	5/6	83	3/4	75	2/2	100		
1987年7月22日	25/37	68	18/28	64	11/13	85	18/26	69	10/12	83	12/15	80
(a) 1987年8月28日	9/11	82			5/7	71	5/8	63	2/4	50	9/11	82
1990年8月9日	5/7	71	11/15	73	1/2	50	3/5	60				
1990年8月11日	12/18	67	15/19	79	5/7	71	8/10	80	2/3	67	5/6	83
合计	77/107	72	59/84	70	34/44	77	47/66	71	19/25	76	31/40	78
总计	136/191		71		81/110		74		50/65		77	
1987年5月12日	21/24	88	14/17	82	8/10	80	10/12	83	5/6	83	4/6	67
1987年5月25日	8/10	80	4/5	80	7/8	87	2/2	100	2/2	100		
1987年7月22日	30/37	81	22/28	79	11/13	85	21/26	81	10/12	83	12/15	80
1987年8月28日	9/11	82			5/7	71	6/8	75	4/5	80	9/10	90
(b) 1990年8月9日	7/7	100	14/15	93	2/2	100	4/5	80				
1990年8月11日	16/18	89	15/19	79	6/7	86	8/10	80	3/3	100	5/6	83
合计	91/107	85	69/84	82	39/47	83	51/63	81	24/28	86	30/37	81
总计	160/191		84		90/110		82		54/65		83	

注:表中I为已跟踪的回波团,II为未跟踪的回波团.

从表2可见:①“I”栏下的预报准确率从总体上高于“II”栏下的准确率,这说明回波团的正确跟踪对提高预报准确率非常重要;②SZM法的预报准确率较高,从而为其走向实用奠定了基础.

6 结束语

- (1) 上述两种方法由于综合考虑了多个因子,提高了跟踪成功率和预报准确率;
- (2) 矩不变量法的跟踪成功率和预报准确率都高于相关亮度综合分析法;
- (3) 多阈值分团法有可能将回波合并前或分裂后的数块小回波划为一个团,有利于跟踪;
- (4) 还需要对更多的资料进行分析处理,以便正确选取各阈值,并了解其对结果的影响.

参考文献

- 1 Wilk K. J., Gray K. G. Processing and analysis techniques used with the NSSL weather radar system. Preprints 14th Conf. on Radar Meteor., 1970, 367-374.
- 2 汤达章,赵清云.相关分析法误差及其来源.南京气象学院学报,1988,11(1):89-99.
- 3 赵清云,汤达章.雷达跟踪回波运动方法的研究(I).南京气象学院学报,1988,11(2):197-207.
- 4 汤达章,李力.一种新的跟踪雷达回波的特征量——矩不变量.南京气象学院学报,1989,11(3):1-8.
- 5 Blackmer R. H. Jr. and Ducla R. O. Application of Pattern recognition techniques to digitized radar data. Preprints 15th Conf. on Radar Meteor., 1972, 138-143.

TWO RADAR ECHO TRACKING METHODS AND COMPARISON BETWEEN THEIR ACCURACIES

Tang Dazhang

(*Nanjing Institute of Meteorology, Nanjing 210044*)

Zhou Yongmei

(*Qinghai Weather Bureau, Xining 810001*)

Hu Mingbao

(*Air Force Institute of Meteorology, Nanjing 211101*)

Abstract

Two kinds of methods in tracking radar echoes, moment invariants and correlation-brightness are investigated. The radar echoes are clustered using multiple threshold, then, the coefficients of moment invariants and correlation-brightness are calculated. They are used as judgment factors to track radar echoes and to forecast their movements. Experiments have been made using real-time radar data. The results show that the accuracy by moment invariants method is higher than the one by correlation-brightness method.

Key words: Echo tracking; Moment invariant; Correlation-brightness.

下期要目

- 青藏高原冬春季雪盖对东亚夏季大气环流影响的数值试验
- 青藏高原地区地表及行星反射率
- 浙江临安水稻田甲烷(CH₄)排放通量的观测研究
- 强对流风暴数值模拟及其未来预报的若干问题
- 用 Brewer 分光光度计遥感大气臭氧垂直廓线的研究
- 云辐射在中期数值预报中作用的数值试验
- 热量动力诊断 NWP 模式的系统误差
- 作物霜冻与低温强度和冰核菌密度的关系
- 共轭方程理论在月平均温度距平季节预报中的应用